

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.131.37:624.131.43

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОДИНОЧНОЙ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ В УСЛОВИЯХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО «СТЕСНЕНИЯ»

канд. техн. наук, доц. **Т.М. УЛАСИК; А.В. БАЛЫШ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлено моделирование работы одиночной буронабивной сваи с помощью программы Plaxis 3D, позволяющее оценить возможность включения в работу сваи области «стеснения», которая формируется в околосвайном пространстве с учетом явления дилатансии. Подобное «стеснение» условий работы сваи в несвязном грунте выполняется посредством погружаемой оболочки. Параметры такой оболочки соотносятся с длиной и диаметром сваи. Погружение оболочки выполнялось на треть, две трети и на всю длину сваи. Выполненные расчеты указывают на максимальное увеличение несущей способности сваи для случая погружения оболочки на всю длину сваи, что наглядно отражено на графиках зависимости осадки сваи от нагрузки. Погружаемая оболочка способствует большей мобилизации контактного трения по боковой поверхности сваи – следствие возникновения условий «стеснения» несвязного грунта в пространстве между оболочкой и свайей.

Ключевые слова: моделирование, «стесненная» дилатансия, дилатантные напряжения, контактное трение, свая, оболочка, несвязный грунт, несущая способность, расчетное сопротивление, продольные усилия.

Введение. При возведении фундаментов глубокого заложения, в частности свайных фундаментов, важнейшим фактором, влияющим на надежность и экономичность таких конструкций, является их несущая способность. Работы многих исследователей посвящены вопросам несущей способности свай, и в современной геотехнике появляются все более новые способы устройства фундаментных конструкций с использованием струйных, полимерных технологий. Опираясь на фундаментальные исследования, посвященные изучению дилатансии несвязных, сыпучих грунтов, контактного трения и сопротивления сдвигу [1], нами проведено моделирование условий работы одиночной сваи. Проведенные ранее исследования поведения модели одиночной забивной сваи в грунтовом лотке [2] показали, что несущая способность сваи в среднем увеличивается на 20% при создании дополнительных условий «стеснения» несвязного грунта в виде погружения ПВХ трубы после устройства забивной сваи, на всю ее длину. Увеличение области «стеснения» вокруг сваи неизменно ведет к увеличению несущей способности. Принципиально важными остаются только начальные физические характеристики несвязного грунта (например, плотность, крупность зерен), в котором возможно проявление дилатансии, а также возможна и максимальная мобилизация контактного трения на боковой поверхности сваи.

Исследование работы одиночной сваи при условии дополнительного «стеснения». Для моделирования воспользовались программой PLAXIS 3D, предназначенной для комплексных расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости геотехнических объектов методом конечных элементов в условиях пространственной задачи.

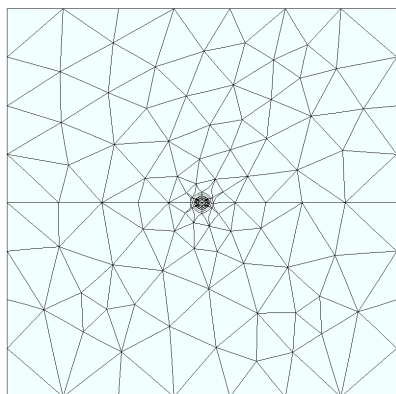


Рисунок 1. – Триангуляция области моделирования (2D-конечноэлементная сетка)

Заданы следующие параметры области моделирования: $Z_{\min} = -8$ м, $Z_{\max} = +8$ м; $X_{\min} = -8$ м, $X_{\max} = +8$ м, $Y_{\max} = 15$ м.

Характеристики грунта: $E_{\text{гр}} = 20$ МПа, $\nu = 0,3$, $\varphi = 34^\circ$, $\psi = 4^\circ$, $\gamma = 20$ кН/м³ (модель пластического разрушения Мора – Кулона).

Свая моделировалась длиной $l = 6$ м, диаметром $d_{\text{св}} = 300$ мм, $E = 40$ ГПа, $\gamma = 24$ кН/м³, $\nu = 0,35$ (линейно деформируемый изотропный материал).

Оболочка, моделирующая «стеснение» горизонтальных перемещений грунта, имеет следующие параметры: $D = 3d_{\text{св}} = 900$ мм, $t_{\text{ст}} = 10$ мм, $E = 40$ ГПа, $\nu = 0,35$, $\gamma = 20$ кН/м³.

На рисунке 1 показана триангуляция области моделирования, на рисунке 2 – формирование трехмерной конечно-элементной сетки (в верхней части рисунка – свая и закрывающая ее оболочка). Оболочка погружается соосно сваяе.

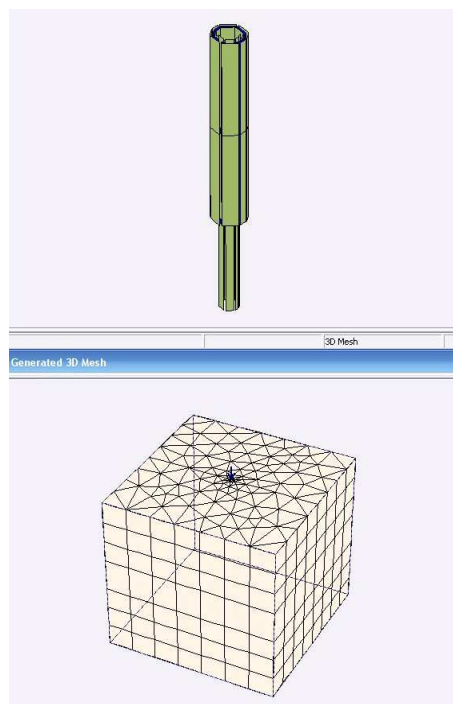


Рисунок 2. – Формирование трехмерной конечно-элементной сетки из 2D-контура триангуляции

Результаты моделирования поведения буронабивной сваи под нагрузкой в конечно-элементной программе Plaxis 3D Foundation приведены ниже в виде таблиц и рисунков. Для случая, когда свая длиной $l = 6$ м и диаметром $d = 300$ мм работает в обычных условиях, определены продольные усилия, возникающие в стволе сваи с приложением $P = 700$ кН на оголовок сваи, а также сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 погонный метр. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Сила трения по грунту и продольные усилия в моделируемой свае без условий дополнительного «стеснения»

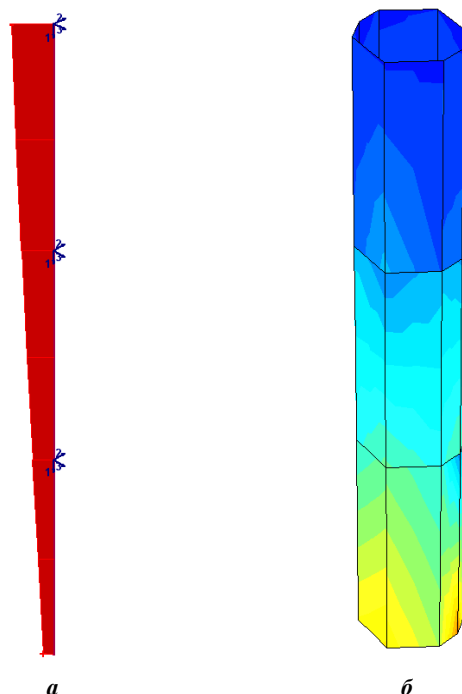
Глубина относительно отметки 0.000, м	Продольное усилие в стволе сваи, кН	Сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 п. м длины сваи, кН
0	700	–
–1	659	41
–2	608	51
–3	538	70
–4	469	69
–5	419	50
–6	373	46
Осадка S при $P = 700$ кН, мм		
141		

В соответствии с нормативными документами [3] определение несущей способности сваи F_d зависит от R_{fi} , расчетного сопротивления (прочности) i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи. Для более плотных несвязных грунтов эти значения, как правило, выше, чем для рыхлых грунтов.

Проведенные исследования [4] показали, что определение скорректированного значения расчетного сопротивления на боковой поверхности сваи объясняется мобилизацией контактного трения. Чтобы максимально реализовать этот процесс, необходимо изменить начальные условия до состояния «стеснения». Такой вывод был сделан нами в процессе подготовки и проведения работ на реальных моделях [5]. Плотность грунта при этом изменяется в большую сторону.

В нашем случае моделирование создания условий дополнительного «стеснения» осуществляется посредством погружаемой на разную глубину (от оголовка сваи) оболочки. Расчет проведен для следующих условий: оболочка погружается на всю длину сваи, т.е. на 6 м; оболочка погружена на 4 и 2 м соответственно. Диаметр погружаемой оболочки принимаем равным $3d$ сваи.

Для того чтобы косвенно оценить значение несущей способности сваи F_d , из полученных данных выбираем значение осадки S и сравниваем её с полученными на следующих этапах моделирования значениями. На рисунке 3 показаны распределения нормальных усилий в свае и оболочке при $P = 700$ кН на оголовке сваи диаметром 300 мм. Диаметр оболочки – 900 мм. Для оболочки значения на эпюре указаны в килоньютонках (кН); вертикальные усилия в оболочке – килоньютонки на метр (кН/м).



***a* – эпюра продольных усилий в стволе ($N_{\min} = 199$ кН, $N_{\max} = 700$ кН);
б – продольные усилия в оболочке ($\max = 6,76$ кН/м, $\min = 92,28$ кН/м)**

**Рисунок 3. – Эпюры продольных усилий в стволе и оболочке
(свая длиной $l = 6$ м, длины сваи и оболочки совпадают)**

Осадка, полученная для случая моделирования при совпадении длин сваи и тонкой оболочки, составила 76 мм. Для случая, когда оболочка отсутствует и дополнительных условий «стеснения» нет, осадка составила 141 мм (см. таблицу 1). Получено уменьшение осадки на 53,9%. Следовательно, увеличение несущей способности сваи происходит за счет формирования области дополнительного «стеснения», которая находится в объеме моделируемого грунта между оболочкой и самой свайей.

Дальнейшее моделирование проводилось для сваи длиной 6 м и погружаемой оболочки диаметром 900 мм и длиной 2 м; для сваи длиной 6 м и погружаемой оболочки диаметром 900 мм и длиной 4 м.

Обобщенные результаты моделирования (усилие в стволе сваи, сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 погонный метр) приведены в таблице 2.

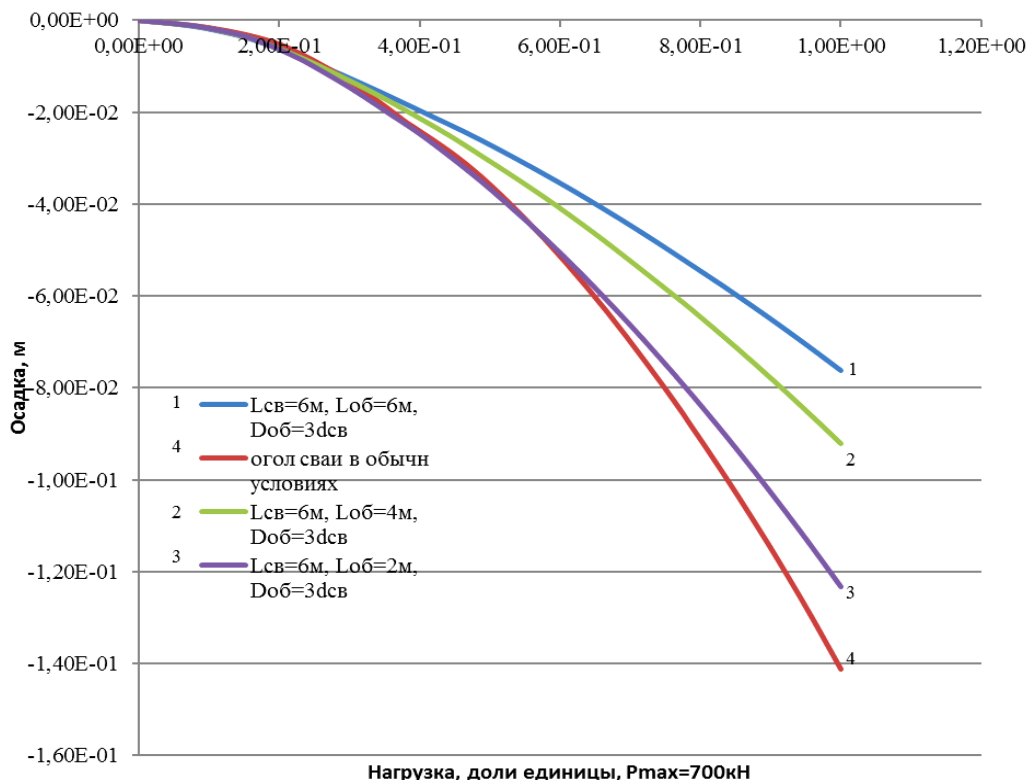
**Таблица 2. – Сила трения по грунту и продольные усилия в моделируемой свайе
при условии дополнительного «стеснения»**

Глубина относительно отметки 0.000, м			Усилие в стволе сваи, кН		Сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 п. м длины сваи, кН	
Свая диаметром <i>d</i> 300 мм, длиной <i>l</i> 6 м	Оболочка диаметром <i>D</i> 900 мм, длиной <i>L</i> , м		при «стеснении» оболочкой длиной <i>L</i> , м			
	4	2	4	2	4	2
0	(отм. 0.000)	(отм. 0.000)	700	700	–	
–1			630	628	70	72
–2		(отм. –2.000)	554	464	76	164
–3			446	393	108	71
–4	(отм. –4.000)		330	322	116	71
–5			245	287	85	35
–6			200	242	45	45

В количественном выражении при погружении оболочки на всю длину сваи объем «стесненного» грунта составляет $339,12 \text{ м}^3$. Объем области «стеснения» для случаев моделирования погружаемой оболочки длиной 4 и 2 м соответственно 211,95 и $127,17 \text{ м}^3$.

Моделирование приведенных в таблице 2 вариантов при равных значениях $P = 700 \text{ кН}$ на оголовки сваи дали следующие величины осадки сваи: для случая погружаемой на 4 м оболочки $S = 92 \text{ мм}$; для оболочки, погружаемой на 2 м, $S = 123 \text{ мм}$. Максимальное уменьшение осадки наблюдается для случая максимального погружения оболочки на всю длину сваи ($S = 76 \text{ мм}$). Промежуточные значения осадки соответствуют погружению оболочки на 4 и 2 м.

На рисунке 4 приведены результаты всех случаев работы сваи, как в условиях без дополнительного «стеснения», так и при совместной работе с погружаемой оболочкой, т.е. в условиях дополнительного «стеснения».



1 – длины сваи и оболочки совпадают (6 м); 2 – длина оболочки меньше длины сваи (4 м);
3 – длина оболочки меньше длины сваи (2 м); 4 – свая работает без оболочки

Рисунок 4. – Изменение осадки сваи от нагрузки для различных случаев «стесненной» работы

Основные параметры сваи и оболочки отражены в таблицах 1 и 2. Рисунок 4 дает наглядное представление о поведении сваи в случае мобилизации слоя грунта, соприкасающегося с ее боковой поверхностью. Ветвь (1) на рисунке 4 показывает оптимальную осадку для конструкции свая – оболочка в сравнении с вариантами без условий «стеснения» (ветвь 4), со «стеснением» (ветви 2 и 3) для объемов области «стеснения» 211,95 и $127,17 \text{ м}^3$ соответственно.

Мобилизация контактного трения вдоль боковой поверхности происходила при планомерном увеличении длины погружаемой оболочки. Так, по эпюре продольных усилий (см. рис. 3) в стволе сваи наблюдается изменение от $N_{\max} = 700 \text{ кН}$ до $N_{\min} = 199 \text{ кН}$. Это говорит о том, что усилие в 501 кН расходуется на мобилизацию контактного трения вдоль боковой поверхности сваи, позволяя тем самым реализоваться условиям «стеснения» объемных деформаций, происходящих в массиве грунта, заключенного между свай и погружаемой оболочкой.

В работах [1; 2] отмечено, что напряженное состояние грунта меняется вследствие изменения условий «стеснения». Это происходит из-за переупаковки зерен несвязного грунта, увеличения дилатантного напряжения $\Delta\sigma_d$ или дилатантного распора [1]. Такое состояние обычно является следствием переупаковки зерен, сближением их, соответственно, уплотнением грунта. В наших исследованиях такое состояние грунтового массива достигается посредством «стеснения» условий работы сваи и устройством погружаемой оболочки на соответствующую моделированию глубину погружения.

Основной причиной того, что работа сваи меняется, является дилатансия. Далее наблюдается мобилизация прочности несвязного грунта в связи с ограничением дилатансии или с проявлением «стесненной» дилатансии [1; 2; 4]. В нашем случае таким ограничением является погружаемая оболочка, имеющая круглоцилиндрическую форму. Возможно, если изменить форму оболочки на усеченный конус, сужающийся к острию сваи, мы получим еще большую несущую способность сваи, работающей в «стесненных» условиях. Эти предположения – предмет дальнейших исследований.

Что касается структуры области «стеснения», то исследования, посвященные «стесненной» дилатансии [1; 2] и её влиянию на несущую способность фундаментных конструкций, показывают, насколько важными являются характеристики грунтового массива, в котором развивается дилатансия. Поэтому важно иметь представление о том, какой грунт мы моделируем в области «стеснения», какими исходными характеристиками он обладает.

Заключение. Результаты моделирования сваи $d = 300$ мм и оболочки диаметром 900 мм показали, что условия дополнительного «стеснения» являются определяющими факторами, влияющими на несущую способность сваи. Увеличение области стеснения за счет погружения оболочки на большую глубину, дает возможность реализовать в грунтовом массиве дополнительное контактное трение, мобилизованное на контактной поверхности сваи.

Проведенные исследования для конструкции свая – оболочка, позволяют сделать следующие *выводы*:

- погружение оболочки на всю длину сваи дает существенное уменьшение осадки сваи, а значит, несущая способность её возрастает;
- осадка сваи при условии максимального дополнительного «стеснения» уменьшается на 53%;
- увеличение объема области «стеснения» планомерно влияет на уменьшение осадки сваи;
- для определения оптимального соотношения диаметров сваи и оболочки необходимо провести дополнительные исследования по моделированию конструкции свая – оболочка;
- дальнейшие исследования по работе сваи в условиях «стеснения» будут проведены для случая изменения структуры области «стеснения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск : Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Уласик, Т.М. Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов / Т.М. Уласик // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 30–33.
3. Проектирование забивных свай. Пособие к строительным нормам Республики Беларусь. П4-2000 к СНБ 5.01.01.-99.
4. Уласик, Т.М. Несущая способность свайных фундаментов с учетом скорректированного значения расчетного сопротивления на боковой поверхности / Т.М. Уласик // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 82–86.
5. Уласик, Т.М. Прочностные испытания грунтов на основе модели контактного сдвига / Т.М. Уласик // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 174–182.

Поступила 05.06.2017

MODELING OF THE WORK OF A SINGLE PILE DRILL UNDER CONDITIONS ADDITIONAL “CONSTRAINT”

T. ULASIK, A. BALICH

Simulation of the work of a single bored pile using of Plaxis 3D programs allows to evaluate the possibility of including in the work of the pile the area of “constraint” that is forming in the near the pile space, taking into account the phenomenon of dilatancy. Such a “constraint” of the working conditions of the pile in the incoherent processing ground through the immersed shell. The parameters of such an envelope correlate with the length and diameter of the pile. The shell is immersed in a third, two thirds and the entire length of the pile. The performed calculations indicate the maximum increase in the bearing capacity of the pile for the case of immersion of the shell over the entire length of the pile. This is clearly reflected in the graphs of the dependence of the draft of the pile on the load. The submerged shell promotes greater mobility of contact friction along the lateral surface of the pile, which is the result of the conditions of “constraint” of the disconnected soil in the space between the shell and the pile.

Keywords: modeling, “cramped” dilatancy, dilatant stress, contact friction, pile, shell, non-cohesive soil, bearing capacity, settlement and resistance, the longitudinal force.